1991—2021年内蒙古降水酸碱度时空变化特征分析

胡亚男[1,2]， 裴 浩[2,3]， 姜艳丰[2,4]， 苗百岭[2,4]， 贾成朕[2,5]

（1. 内蒙古自治区气象服务中心，内蒙古 呼和浩特 010051；2. 内蒙古自治区荒漠生态气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051；3. 内蒙古自治区气象局，内蒙古 呼和浩特 010051；4. 内蒙古自治区气象科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010051；5. 内蒙古自治区生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051）

摘 要：为了解内蒙古降水酸碱度的演变特征，使用全区酸雨站历史观测资料和气象要素、大气污染物浓度数据，分析降水pH值和酸雨、碱雨频率等时空分布特征及影响因素，其中碱雨阈值以酸雨为基准，定义为pH＞8.4的降水。结果表明：（1）由于内蒙古土壤酸碱度大多呈碱性且风沙缓冲作用较强，大部分地区碱性降水占比高于酸性降水，仅东北部的满洲里酸性降水占比更高；酸雨和碱雨发生概率较小，分别占总观测次数的1.1%和3.6%。（2）降水pH值的空间分布表现为：中部＞西部＞东部的特征，近15 a（2007—2021年）年均降水pH值均值为6.2（满洲里）~7.2（锡林浩特），属于非酸雨区；近5 a内蒙古大部分地区酸雨、碱雨频率下降，仅乌拉特中旗的酸雨频率和阿拉善左旗的碱雨频率上升较明显。（3）降水pH低值多出现在夏季汛期6—9月，高值在春季4—5月和冬季1—2月，这与地表植被覆盖度、降水量、风速风向、沙尘和寒潮等因素密切相关；另外，由于采暖期燃煤释放SO_2和NO_x等酸性气体，在呼和浩特、通辽等大气污染物浓度较高的地区，冬春季也存在降水pH值偏低的情况。

关键词：降水pH值；酸雨；碱雨；时空特征；内蒙古

雨、雪等在降落过程中吸收并溶解空气中人为或自然排放的酸性、碱性物质，会导致区域降水酸化或碱化，对公众健康、工农业生产、生态环境均有重要影响[1-2]。酸雨污染相对碱雨影响范围更广、程度更甚，从20世纪70年代开始，酸雨就是环境保护等科学研究领域的重要课题，随着我国工业化、城市化进程加快，机动车保有量急剧增加，酸雨从“硫酸型”逐渐转变为“硫酸硝酸混合型”[3-4]。

我国酸雨区主要分布在长江以南-云贵高原以东地区[5]，因此，关于南方地区酸雨时空分布特征及成因分析的研究较多，对于北方地区降水酸碱度的研究较少。徐菲菲等[6]研究表明，合肥市冬季酸雨污染最重，夏季最轻；而张良玉等[7]发现，京津冀地区冬春季降水pH大于夏秋季，说明酸雨具有明显的季节特征和地域差异。酸雨成因的研究大多关注致酸前体物、气象条件和区域输送等因素，牛彧文等[8]和程龙等[9]研究表明，SO_2排放减少是近年来酸雨污染出现好转的重要原因，但NO_x对酸雨的贡献有增加趋势，机动车尾气排放对酸雨污染的贡献不容忽视；郑秋萍等[10]除了大气污染物，还分析了降雨强度、主导风向和天气形势等气象条件对酸雨的影响；郭雅思等[11]和陈虹颖等[12]利用Hysplit后向轨迹分季节或分类模拟，对酸雨水汽来源进行追踪、聚类，分析了区域输送的影响。

碱雨多发生在我国北方地区，对农业生产和生态环境也有不利影响[13]。张宝贵等[14]通过实验研究发现，当降水pH＞8.5时，土壤离散度高，湿时膨胀、干时板结，通透性很差，会增加植物患病率、枯萎率和烂根率；内蒙古土壤普查结果[15]也表明，pH＞8.5的碱性、强碱性耕地已经严重减产甚至绝收。目前，关于碱雨成因分析的研究较少，高登好等[16]环境监测结果显示，水泥厂、电厂等降尘污染严重的区域，降水pH显碱性，清洁区降水显弱酸性；刘安娜[17]研究表明，地表物质扬起而形成的悬

收稿日期：2022-09-14； **修订日期：**2022-11-22
基金项目：国家自然基金地区基金项目(31960261)；内蒙古自然基金面上项目(2019MS03028)；内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx202323)
作者简介：胡亚男(1992-)，女，硕士，主要从事大气环境研究. E-mail: 448329454@qq.com
通讯作者：裴浩. E-mail: peihao5217@sohu.com

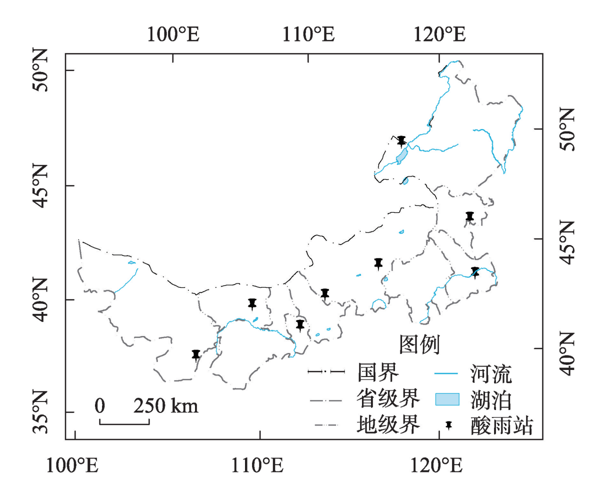
浮物对大气降水的pH值偏向于弱碱性起到了主要的作用;Zhang等[18]发现,来自土壤的高浓度NH_4^+和Ca^{2+}可以使酸雨减少,NH_4^+和Ca^{2+}的中和能力由我国南部向北部递增[19];另外,氨肥和钙镁磷肥等使用也会使土壤碱化程度加剧[14],进一步作用于降水。

内蒙古煤炭资源储量居全国第一,钢铁、火电等行业对煤炭消耗量大,工艺过程中产生SO_2以及机动车尾气产生的NO_x等酸性气体会增加降水酸性[20],但由于内蒙古大部分地区土壤酸碱度呈碱性[15],且气候干旱、风力偏大,降水中的酸会被空气中大量碱性物质中和,使得降水的酸性大幅下降,甚至表现为碱性。本文通过分析1991—2021年全区8个酸雨站的历史观测数据,研究20世纪90年代以来,内蒙古降水酸碱度的年、月变化特征和空间分布特征,分析讨论土壤酸碱度、气象条件和人为排放等因素对降水酸碱度、电导率的影响,为防治酸雨、碱雨污染提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

内蒙古共8个国家气象观测站设有酸雨观测项目,站点分布如图1所示,自西向东依次为阿拉善左旗(阿拉善盟)、乌拉特中旗(巴彦淖尔市)、呼和浩特(呼和浩特市)、朱日和(锡林郭勒盟)、锡林浩特(锡林郭勒盟)、通辽(通辽市)、乌兰浩特(兴安盟)和满洲里(呼伦贝尔市),其中西部地区2个酸雨站,中部和东部地区均为3个,站点分布较均匀,具有一定代表性。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2017)3320号,对底图边界无修改。

图1 内蒙古酸雨观测站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of acid rain observation stations in Inner Mongolia

内蒙古地处中纬度内陆,大部分地区属于温带大陆性季风气候[21],仅大兴安岭北段属寒温带大陆性季风气候。冬季漫长严寒,春季风大少雨,夏季温热短促,秋季气温剧降。气象灾害中属干旱最为严重,其次为寒潮,雨雪常伴随大风、降温、沙尘等天气出现。由于内蒙古大部分地区气候干旱,淋溶作用不能将盐基成分从土壤中大量淋洗掉,部分土壤盐基成分聚集[22],甚至富集可溶盐,使得土壤呈中性、碱性或强碱性。内蒙古土壤表土pH面积普查结果显示[15],碱性土壤占总面积的78.1%,酸性和中性土壤分别占比13.7%和8.2%,土壤pH值由东向西逐渐递增,范围在5.86~9.03。从土壤区划[23]来看(表1),除了内蒙古东部偏东地区属于湿润、半湿润土壤区,其余地区均属于干旱、半干旱土壤区。

表1 内蒙古土壤区划

Tab. 1 Soil regionalization in Inner Mongolia

土壤区划	土壤类型	酸雨观测站
东部湿润、半湿润土壤区	寒棕壤、暗棕壤、黑土带	乌兰浩特、通辽
蒙新干旱、半干旱土壤区	黑钙土、栗钙土、黑垆土带	呼和浩特、朱日和、锡林浩特、满洲里
	灰钙土、棕钙土带	乌拉特中旗
	灰漠土带	阿拉善左旗

1.2 数据资料

1.2.1 酸雨数据及订正校验 《酸雨观测规范》(GB/T 19117—2017)[24]规定,当降水量≥1.0 mm时,观测降水pH值、电导率、降水量和风向、风速等要素,观测时制为当日北京时08:00至次日08:00。大气降水pH值定义为大气降水中氢离子浓度的负对数,用来表征大气降水酸碱度,无量纲。大气降水电导率(简称K值)是大气降水导电能力的度量,单位为μS·cm^{-1},可以间接反应降水的洁净程度[25-26],K值越小,说明降水的电阻率越高,导电能力越弱,降水越纯净。

参照标准[24]对酸雨数据进行订正校验,由于内蒙古1991—2005年酸雨资料中的K值未订正为25 ℃的K值,需要将在温度t下测得的K值订正为25 ℃的K值,公式如下:

$$K_s = \frac{K_t}{1 + 0.022(t - 25)} \quad (1)$$

式中：K_s为25 ℃的电导率(μS·cm^{-1})；K_t为温度t下测得的电导率(μS·cm^{-1})；t为样品的测量温度(℃)。此外，还需要通过数据校验筛除异常的pH值和K值，将实测的降水pH值和K值代入下式计算ΔK，若$\Delta K \geqslant 0$，则通过校验，否则为不通过。

$$\Delta K = K - A_{H^+} \times 10^{-pH} - A_{OH^-} \times 10^{pH-14} \quad (2)$$

式中：ΔK为实测降水电导率与氢离子电导率之差(μS·cm^{-1})；K为降水电导率(μS·cm^{-1})；pH为降水pH值；A_{H^+}为氢离子摩尔电导率(3.497×10^5 μS·cm^2·mol^{-1})；A_{OH^-}为氢氧根离子摩尔电导率(1.986×10^5 μS·cm^2·mol^{-1})。内蒙古酸雨数据基本信息见表2，除了呼和浩特1995年酸雨观测记录缺失，其余酸雨站观测数据完整且质量较好，各站筛除未通过校验数据样本仅0~7个。

1.2.2 *气象数据和大气污染物数据* 2007—2021年气象要素日值数据来自酸雨站所在国家气象观测站，包括平均气温、相对湿度、当日08:00至次日08:00降水量、平均风速、最大风速、大风日数、沙尘日数(包括沙尘暴、扬沙和浮尘)。2017—2021年酸雨站所在盟市的大气污染物(PM_{10}、SO_2和NO_2)浓度逐小时数据来自中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台。

1.3 研究方法

采用标准[24]中雨量加权平均法统计年、月平均降水pH值和K值(即pH_{avg}, K_{avg})，平均降水pH值通过对某一时段内(年、月)所有日降水pH值和对应日降水量进行氢离子浓度-雨量加权平均计算，具体公式如下：

$$[H^+]_i = 10^{-pH_i} \quad (3)$$

$$pH_{avg} = -\lg\left\{\frac{\sum [H^+]_i \cdot V_i}{\sum V_i}\right\} \quad (4)$$

$$K_{avg} = \frac{\sum K_i \cdot V_i}{\sum V_i} \quad (5)$$

式中：pH_i为日降水pH值；K_i为日降水电导率(μS·cm^{-1})；V_i为日降水量(mm)；$[H^+]_i$为日降水氢离子浓度(mol·L^{-1})。在分析年际变化时，采用完整日历年的观测数据进行统计，即朱日和统计1991—2021年，呼和浩特和阿拉善左旗统计1992—2021年，其他站统计2007—2021年；在分析空间分布和月变化特征时，采用统一时段(2007—2021年)的数据进行统计。

《酸雨和酸雨区等级》(QX/T372—2017)[27]规定，酸雨等级以日降水pH值划分，pH < 5.6为酸雨，pH < 4.5为强酸雨；酸雨频率(F)为某一时段(年、月)内日降水pH < 5.6的次数占该时段内所有酸雨观测次数的百分率，酸雨频率等级划分见表3。由于碱雨目前尚未有标准规范其阈值范围，以酸雨、强酸雨阈值与pH=7.0的差值为基准，将pH > 8.4定义为碱雨，pH > 9.5定义为强碱雨；碱雨频率为某一时段(年、月)内日降水pH > 8.4的次数占该时段内所有酸雨观测次数的百分率，频率等级划分同酸雨频率等级。

2 结果与分析

2.1 降水pH值频率分布

内蒙古8个酸雨站自观测以来，降水pH值在3.7~10.5，最小值出现在2012年12月28日的通辽，最大值出现在2006年12月29日的朱日和。截至

表2 内蒙古酸雨数据观测时间和样本数量

Tab. 2 Observation time and sample quantity of acid rain data in Inner Mongolia

地区	酸雨站	数据资料观测时间/年-月	通过校验数据样本量	未通过校验数据样本量
东部	满洲里	2006-07—2021-12	624	2
	乌兰浩特	2006-07—2021-12	771	3
	通辽	2007-01—2021-12	628	1
中部	锡林浩特	2006-07—2021-12	711	0
	朱日和	1991-05—2021-12	947	7
	呼和浩特	1992-01—2021-12	1308	0
西部	乌拉特中旗	2006-07—2021-12	465	1
	阿拉善左旗	1992-01—2021-12	965	0

表3 酸雨频率等级划分

Tab. 3 Acid rain frequency classification

级别	酸雨频率
酸雨偶发	$F<5\%$
酸雨少发	$5\%<F\leq 20\%$
酸雨多发	$20\%<F\leq 50\%$
酸雨频发	$50\%<F\leq 80\%$
酸雨高发	$F>80\%$

2021年底,全区酸雨站的酸雨出现次数共计71次,占总观测次数的1.1%,碱雨共231次,占总观测次数的3.6%,其中,强酸雨9次,强碱雨13次。从降水pH值频率分布(图2)来看,内蒙古降水酸碱度较适中,对生态环境影响较小,阿拉善左旗、乌拉特中旗、朱日和和锡林浩特pH频率高值区间在7.0~8.0,呼和浩特、通辽和乌兰浩特在6.5~7.5,满洲里在6.0~7.0,呈由西向东递减的趋势。

若以pH=7.0为界划分酸性降水(pH<7.0)和碱性降水(pH>7.0),内蒙古碱性降水次数占总观测的63.9%,酸性降水占35.8%,中性降水占0.3%,说明内蒙古降水受碱性物质的影响更大。除了东北部地区的满洲里酸性降水占比远高于碱性降水,为84.9%,其余站点均表现为碱性降水占比更高,中部地区的锡林浩特和朱日和碱性降水占比高达87.2%和83.6%,西部地区的阿拉善左旗和乌拉特中旗为74.9%和72.9%,其次,中部地区的呼和浩特为59.3%,东部地区的乌兰浩特和通辽分别为51.6%和58.4%,说明中西部地区碱性物质的中和作用比东部地区更强。

Zeng等[28]通过对降水中离子成分的来源解析发现,NH_4^+来自农业活动和自然过程,Ca^{2+}、K^+和Mg^{2+}来自地壳输入,说明降水中碱性离子成分主要来自于地表,而内蒙古大部分地区土壤酸碱度呈碱性,加之气候干旱,风速偏大,地表扬起的碱性物质混入降水,使得碱性降水占比较高。从近15 a气象要素和大气污染物浓度的统计值来看(表4),满洲里虽然平均风速较大、大风日数较多,但由于低温、高湿的气候特点,沙尘日数较少,降水受碱性物质影响较小;中部地区的呼和浩特、朱日和和锡林浩特虽然大风、沙尘日数较多,但由于呼和浩特降水量较大,对碱性物质的冲刷稀释作用更强,碱性降水占比较中西部地区其他站偏低,此外也与人为排放的酸性物质有关,尤其NO_2浓度较高。

2.2 空间分布特征

使用近15 a(2007—2021年)内蒙古8个酸雨站年平均降水pH值、年平均*K*值和年酸雨、碱雨频率的多年均值来分析空间分布特征如图3所示,横坐标站点从左到右依次表示地理位置从西到东。内蒙古8个酸雨站降水pH值为6.2~7.2,均属于非酸雨区,中部地区的锡林浩特和朱日和降水pH值较大,分别为7.2和7.1,东部地区的满洲里和通辽降水pH值较小,分别为6.2和6.4。总体来看,内蒙古降水pH值空间分布表现为:中部>西部>东部的特征,这是因为中西部地区相对东部地区气候干旱、沙尘天气较多,而中部地区比西部地区的平均风速更大、大风日数更多,同时也使得降水中混合颗粒物等杂质较多,大气降水电导率偏高。内蒙古8个酸

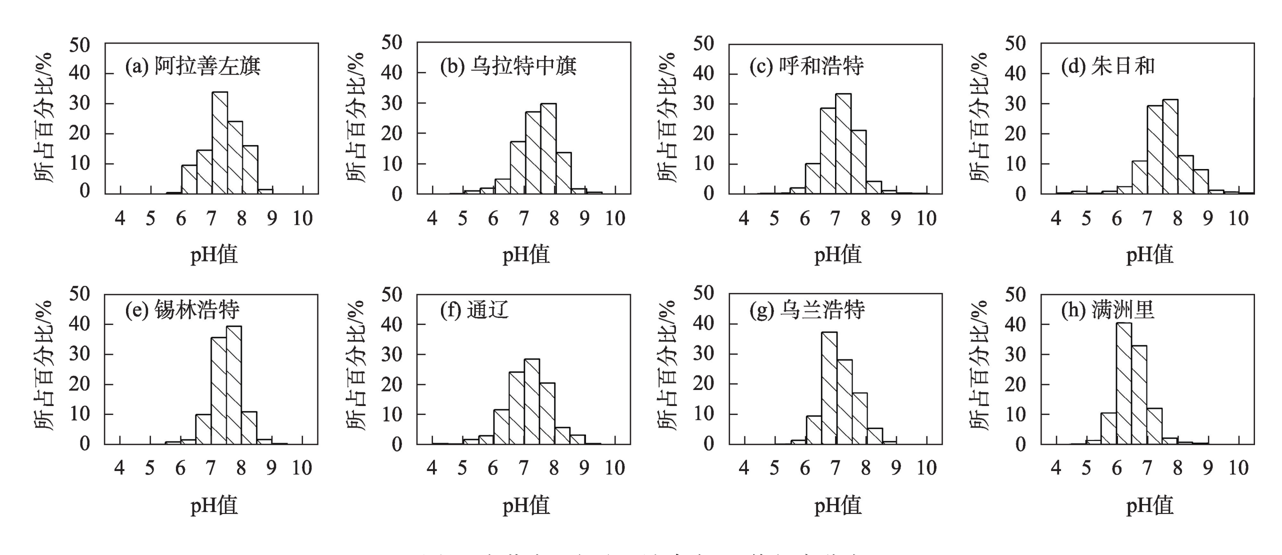


图2 内蒙古8个酸雨站降水pH值频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of precipitation pH value in eight acid rain stations in Inner Mongolia

表4 内蒙古8个酸雨站气象要素和污染物浓度统计值

Tab. 4 Statistical values of meteorological elements and pollutant concentrations of eight acid rain stations in Inner Mongolia

站名	平均气温/℃	平均相对湿度/%	平均年降水量/mm	平均风速/(m·s^{-1})	平均日最大风速/(m·s^{-1})	平均年大风日数/d	平均年沙尘日数/d	平均SO_2浓度/(μg·m^{-3})	平均NO_2浓度/(μg·m^{-3})
阿拉善左旗	9.3	37	230	2.0	5.4	5	18	9.1	10.0
乌拉特中旗	6.6	45	237	2.6	6.7	15	9	–	–
呼和浩特	7.6	47	411	2.8	5.9	29	11	16.8	36.0
朱日和	6.1	46	205	4.5	8.9	50	13	–	–
锡林浩特	3.6	54	290	3.3	7.2	24	12	15.1	12.3
通辽市	7.8	53	391	2.7	6.2	5	4	11.8	20.0
乌兰浩特	6.2	49	463	2.3	5.8	10	2	6.4	14.2
满洲里	−0.2	60	272	4.1	7.9	32	3	–	–

注：气象要素统计时间为2007—2021年，污染物浓度统计时间为2017—2021年。

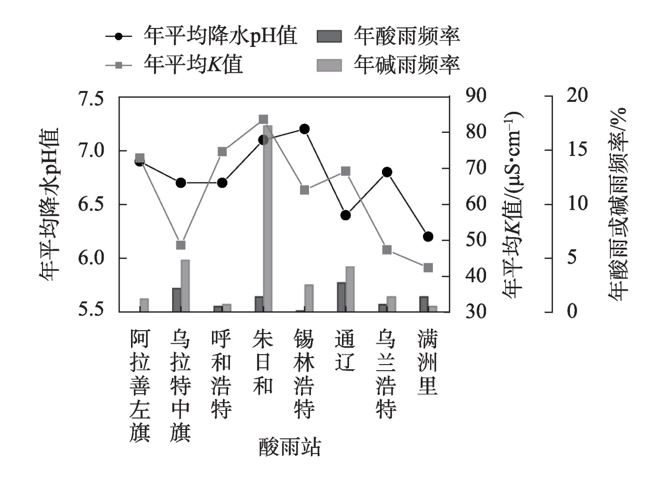


图3 近15 a(2007—2021年)内蒙古8个酸雨站年均降水pH值、年均K值和年酸雨、碱雨频率

Fig. 3 Multi-year mean values of pH value, K value and frequency of acid rain and alkali rain in eight acid rain stations in Inner Mongolia from 2007 to 2021

雨站年平均K值为42.3~83.7 μS·cm^{-1}，东北部地区的满洲里和乌兰浩特K值明显低于其他站，降水中杂质较少，乌拉特中旗相对中西部地区其他站降水更洁净。从酸雨频率来看，各站平均年酸雨频率均小于3.0%，属于“酸雨偶发”等级，其中通辽酸雨频率最高，为2.7%，乌拉特中旗为2.2%，满洲里和朱日和为1.4%，其余站不足0.5%。从碱雨频率来看，朱日和平均年碱雨频率最高，为17.3%，属于“碱雨少发”等级，其他站均小于5%，属于“碱雨偶发”等级。

2.3 时间变化特征

2.3.1 年际变化 如图4所示，由于内蒙古地域辽阔，各站距离较远且气候环境背景不同，使得年际变化表现也不同。从线性拟合趋势来看，内蒙古西部、中部偏西及东北部地区降水pH值总体呈减小趋势，中部偏东及东部大部地区呈增大趋势，其中，乌拉特中旗和呼和浩特减小趋势明显，朱日和和通辽增大趋势明显，其余站则表现较为平稳。从内蒙古站点平均值(图4i)来看，2007—2021年降水pH值为6.4~7.0，总体呈略微增大的趋势，在2012年和2018年出现谷值，其中，2018年酸雨频率最高，为4.2%，2016年碱雨频率最高，为11.5%。

阿拉善左旗、呼和浩特和朱日和从20世纪90年代开始酸雨观测，90年代阿拉善左旗和呼和浩特降水pH值和碱雨频率均较高，之后碱雨频率逐渐减少，而朱日和表现与之相反。从单站来看，阿拉善左旗1992—2021年降水pH值为6.1~7.8，在2009—2013年较其他年份偏低；酸雨仅出现在1993年、1995年，碱雨主要出现在2003年之前，直至2017年、2021年再次出现碱雨，频率分别为6.5%和12.0%。呼和浩特1992—2021年降水pH值为6.0~7.6，酸雨仅出现在2008年、2014年，碱雨主要出现在1992—1996年，截至2021年，已连续7 a未检出酸雨和碱雨。朱日和1991—2021年降水pH值为5.2~8.5，其中1992年、1996年较低，分别为5.4和5.2；酸雨主要出现2016年之前，截至2021年，已连续6 a未检出酸雨；碱雨在2005—2008年和2014—2016年频率较高，其中2016年高达81.8%，属于“碱雨高发”等级；朱日和酸雨、碱雨频率较其他站偏多，考虑主要与周围环境污染源有关，朱日和镇是以金属冶炼为主导产业的新兴工业重镇，冶金排放的烟气为SO_2、NO_x等酸性气体和烟粉尘颗粒物，使得降水吸收溶解部分酸性、碱性物质；另外，朱日和大风、沙尘天气较多，地表扬起的碱性物质也会使降水呈

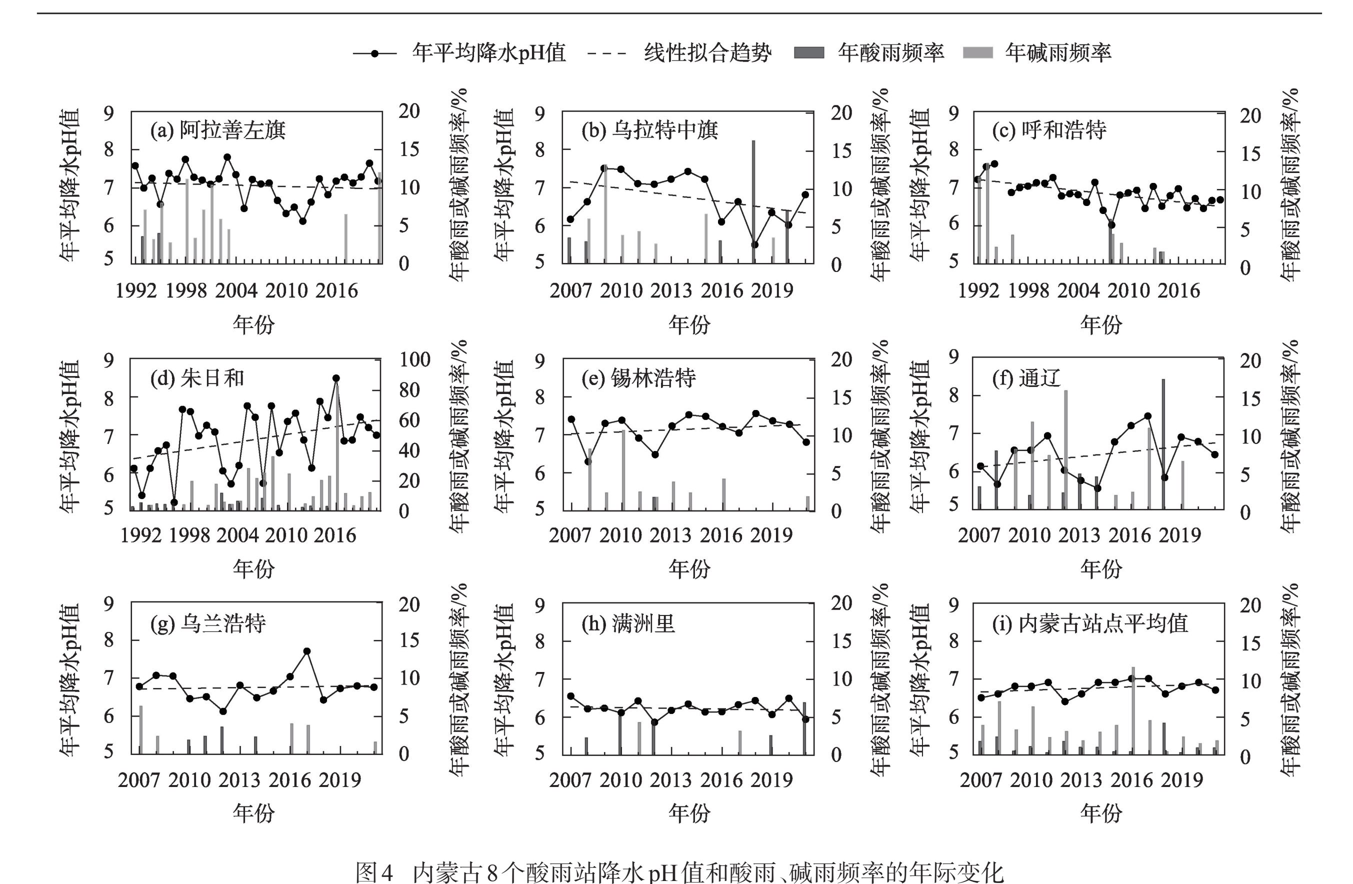


图4 内蒙古8个酸雨站降水pH值和酸雨、碱雨频率的年际变化

Fig. 4 Annual variation of precipitation pH value and frequency of acid rain and alkali rain in eight acid rain stations in Inner Mongolia

碱性。

其他酸雨站完整观测时间为2007—2021年,其中,乌拉特中旗和通辽降水pH值和酸雨、碱雨频率年际变化波动较大,锡林浩特、乌兰浩特和满洲里变化幅度较小。从单站来看,乌拉特中旗2007—2021年降水pH值为5.5~7.5,有先增后减的趋势,在2009—2015年较其他年份偏高,从2016年开始,降水pH值明显减小且酸雨频率增多,2018年、2020年酸雨频率分别为16.1%和6.9%。通辽2007—2021年降水pH值为5.6~7.5,3次谷值分别出现在2008年、2014年、2018年;酸雨主要出现在2007—2014年,除2018年酸雨频率高达17.1%,2015—2021年酸雨频率均为0%;碱雨主要出现在2009—2012年和2015—2019年,2012年碱雨频率最高,为15.6%,其次2010年、2017年分别为11.5%和10.7%。锡林浩特2007—2021年降水pH值为6.3~7.6,酸雨仅在2012年出现1次,碱雨主要出现在2008—2016年,其中2010年碱雨频率最高,为10.6%。乌兰浩特2007—2021年降水pH值为6.1~7.7,在2017年较其他年份偏高;酸雨主要出现在2010—2014年,截至2021年,已连续7 a未检出酸雨;碱雨主要出现在2007—2008年、2016—2017年和2021年,频率为1.6%~6.3%。满洲里2007—2021年降水pH值为5.9~6.6,相对其他站降水pH值偏低且年变化幅度较小;在2021年酸雨频率最高,为6.9%;碱雨频率相对其他站偏低,仅出现在2011年、2017年。

由于年际变化序列较长,将内蒙古8个酸雨站近15 a(2007—2021年)年均降水pH值、年酸雨频率和碱雨频率以5 a为间隔求均值对比分析如图5所示。从降水pH值来看,阿拉善左旗和锡林浩特呈上升趋势,中西部地区其他站(乌拉特中旗、呼和浩特和朱日和)呈“先升后降”的趋势,东部地区站点呈“先降后升”的趋势;乌拉特中旗、呼和浩特和朱日和近5 a降水pH值均值较前5 a分别下降了0.75、0.16和0.29,其余站上升了0.02~0.51,其中阿拉善盟上升最多。从酸雨频率来看,乌拉特中旗、通辽和满洲里近5 a酸雨频率均值较前5 a分别升高了4.0%、1.2%和1.0%,其余站明显下降,且近5 a酸雨频率为0%。从碱雨频率来看,除了阿拉善左旗、乌兰浩特和满洲里略微上升,其他站均表现为下降趋

势，尤其朱日和近5 a碱雨频率均值较前5 a下降20.4%。总体来看，近5 a内蒙古酸雨、碱雨频率表现为减少趋势，仅乌拉特中旗的酸雨频率和阿拉善左旗的碱雨频率上升较明显。从站点平均来看，近5 a较前5 a降水pH值均值升高0.02，酸雨频率均值升高0.34%，碱雨频率均值下降2.54%。

2.3.2 月变化 内蒙古8个酸雨站的月平均降水pH值、月平均*K*值和酸雨、碱雨频率月变化如图6所示。各站降水pH低值多出现在6—9月，主要为夏季汛期，相应的酸雨频率也较高。结合酸雨观测时的气象要素和大气污染物浓度月变化特征来看(图7)，该时期由于地表植被覆盖较多，风速较其他月

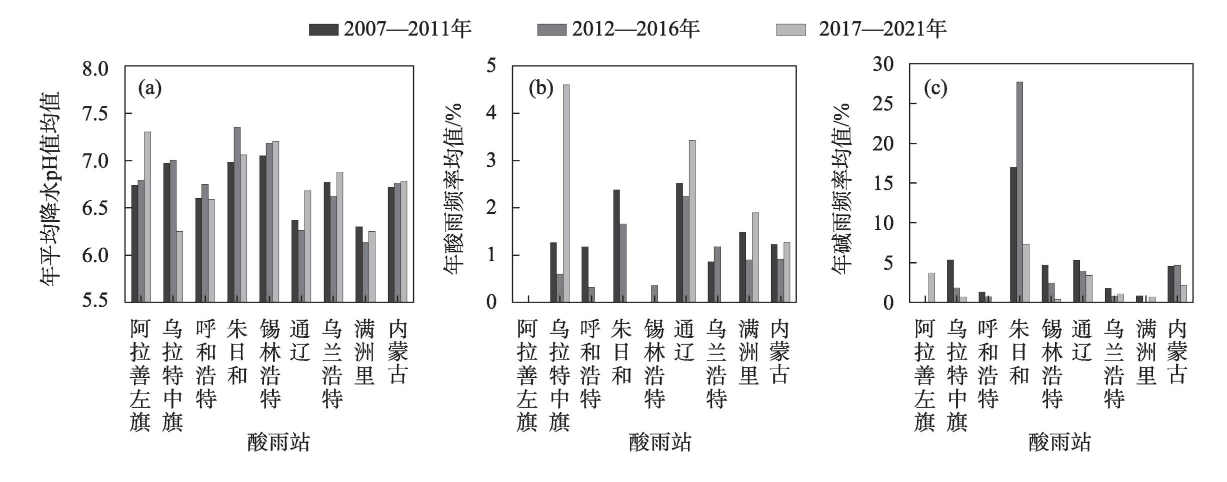


图5 内蒙古8个酸雨站降水pH值和酸雨、碱雨频率的逐5 a变化

Fig. 5 Change of pH value, frequency of acid rain and frequency of alkali rain in eight acid rain stations in Inner Mongolia from five years to five years

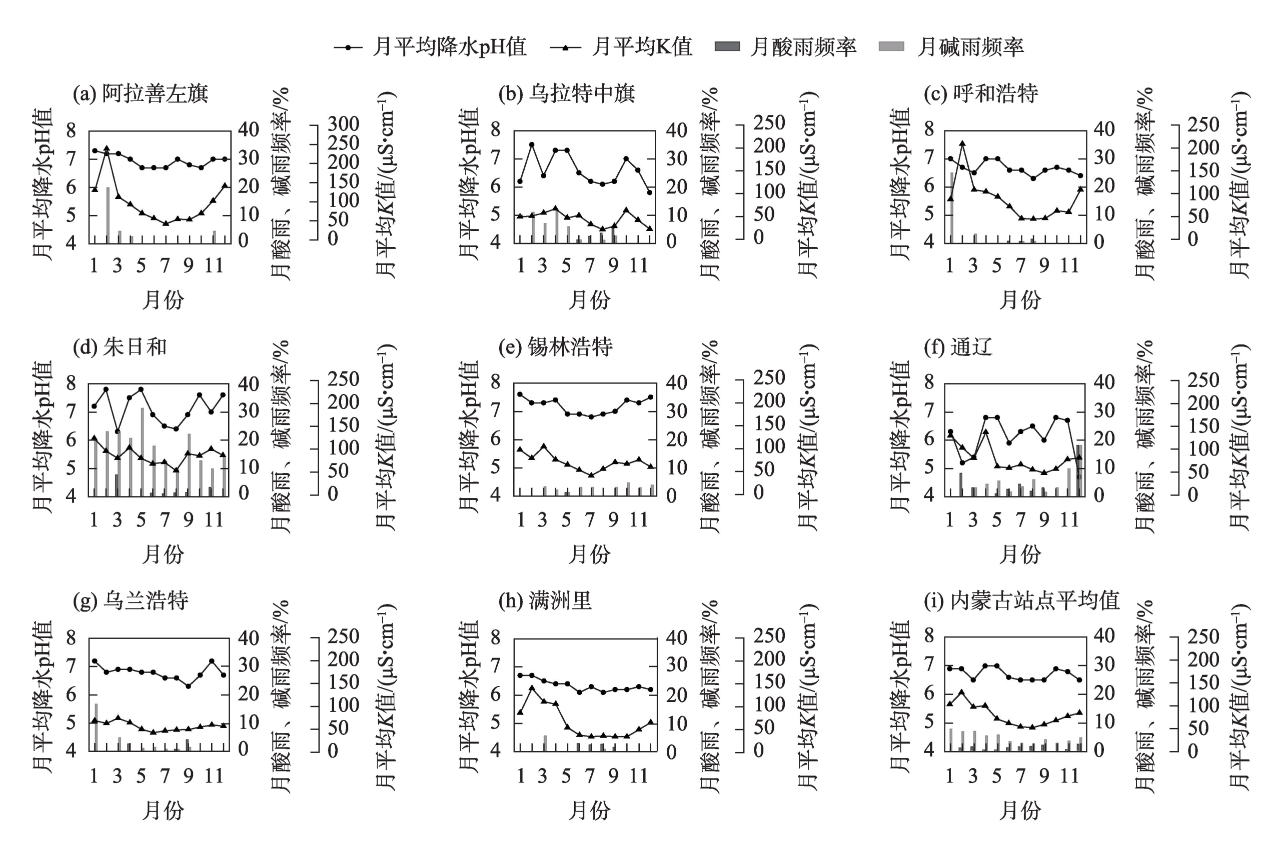


图6 内蒙古8个酸雨站降水pH值和酸雨、碱雨频率的月变化

Fig. 6 Monthly variation of precipitation pH value and frequency of acid rain and alkali rain in eight acid rain stations in Inner Mongolia

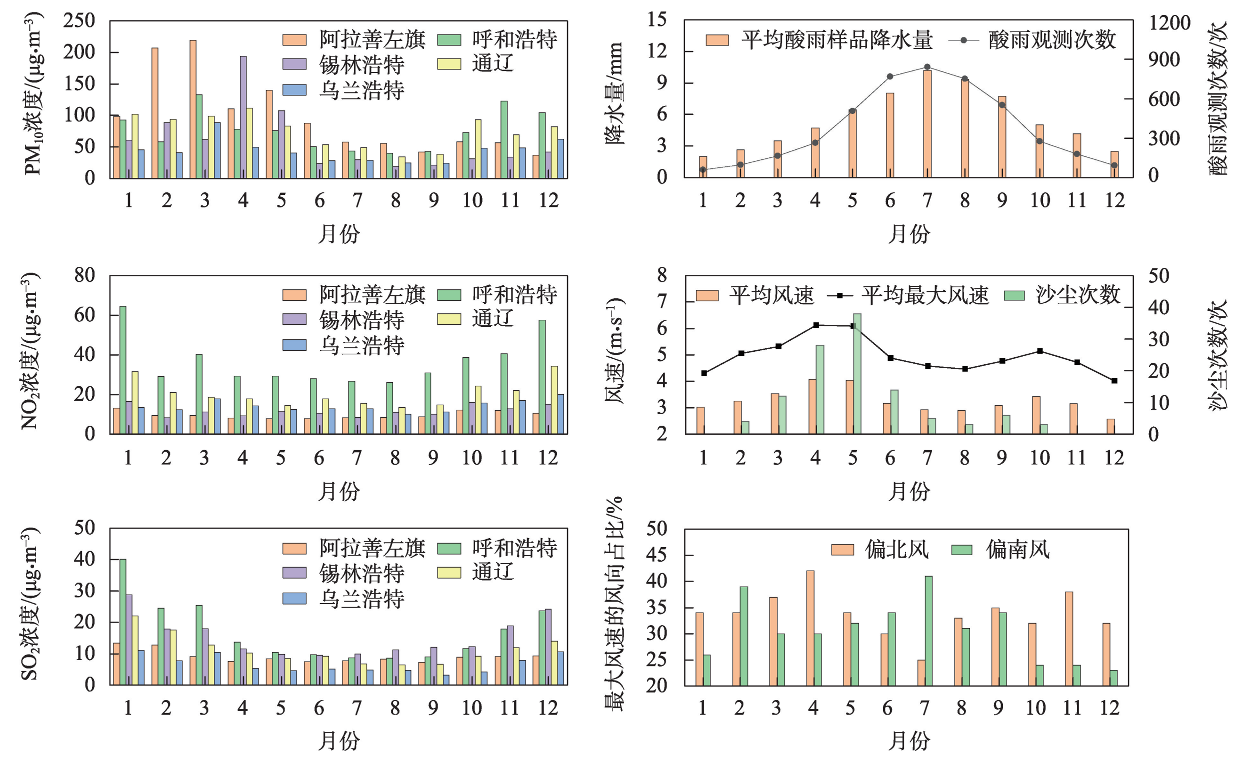


图7 内蒙古酸雨站气象要素和大气污染浓度的月变化

Fig. 7 Monthly variation of meteorological elements and air pollution concentration in acid rain station in Inner Mongolia

份偏小,同时降水量较大、频次较高,使得地表扬起的碱性颗粒物减少,大气中PM_{10}浓度降低,相应地人为排放的酸性物质被中和的部分也减少,导致酸雨频率升高;而且该时期地面偏南风增多,水汽输送的过程中携带来自南方的酸性物质,也会使得降水pH值降低。各站降水pH高值多出现在春季4—5月和冬季1—2月,其次,秋季10—11月、春季3月和冬季12月降水pH值也较高。这是因为该时期地表裸露干燥,尤其4—5月风力较大,使得空气中扬沙、浮尘等颗粒物较多,PM_{10}浓度较高,但由于降水频次低、降水量较小,冲刷稀释碱性物质的作用不明显,导致降水pH值偏高;Wu等[29]的研究也表明,在受沙尘天气影响的半干旱区,春季降水pH值有明显的峰值,且与沙尘天数的增加吻合。此外,该时期降水经常发生在寒潮来临时,伴随大风、降温和沙尘天气,受偏北气流控制,不利于南部酸性物质的输送,更有利于来自北部蒙古国[30]等地区碱性物质的输送。

值得注意的是,乌拉特中旗、呼和浩特、朱日和和通辽在非汛期,尤其在3月和12月,存在降水pH值偏低的情况,其中,朱日和在3月的酸雨频率为7.7%,通辽在12月的酸雨频率为18.2%。考虑原因:由于内蒙古大部分地区采暖期为10月至次年4月,燃煤会释放SO_2、NO_x和烟尘等颗粒物,尤其是散煤的燃烧,没有经过脱硫、脱硝和除尘等工序,SO_2、NO_x会导致降水酸化,而且该时期大气层结相对静稳,扩散条件一般或较差,使得大气污染物更容易积累;从大气污染浓度的月变化特征来看(图7),上述地区SO_2和NO_2浓度较其他站偏高,受人为排放影响较大,而阿拉善左旗、锡林浩特、乌兰浩特和满洲里属于空气较清洁的地区,大气污染物浓度较低,受人为排放影响较小。

大气降水电导率(K值)的月变化特征与降水pH值有相似之处,即在夏季汛期6—9月,K值较低,各站月平均K值最小值为31.0~ 57.6 μS·cm⁻¹;K值高值出现在1—4月,各站月平均K值最大值为73.1~253.0 μS·cm⁻¹;总体表现为“中间小、两头大”的月变化特征。这是由于内蒙古冬春季大气中首要污染物为PM_{10}等颗粒物,大气层结相对稳定、污染物不易扩散,使得降水过程中混合杂质较多,而夏季垂直对流和湍流活动强烈,大气扩散条件较好,空气中颗粒物浓度较低,K值则较小。从内蒙古站点平均值来看(图7i)),K值峰值在2月,为128.7 μS·cm⁻¹,谷值在8月,为51.3 μS·cm⁻¹;碱雨频率与K

值在0.01水平上呈显著正相关，相关系数达0.84，也表现为冬春季大于夏秋季。

3 讨 论

大气降水酸碱度主要受区域环境和人为排放的影响，前者为区域气候条件、土壤酸碱度等自然因素，后者为人类活动排放的酸性或碱性物质[17]。内蒙古由于气候干旱使得大部分地区土壤呈碱性，尤其中西部地区植被覆盖率较低，平均风力较大，一方面容易使地表碱性物质进入空气和降水中，另一方面有利于人为排放的酸性气体等污染物扩散，同时也被空气中的碱性物质中和，而且内蒙古相对京津冀、长三角等经济发达、人口密集的地区，人为排放量相对较少，因此，降水酸碱度总体表现为碱性占比更高。

降水pH值随降水量的变化与区域大气背景酸碱度密切相关，内蒙古降水pH值和*K*值随降水量的增大而减小，这与刘玉彻等[31]对沈阳地区的研究结论一致；而郑秋萍等[10]对福建的研究则表明，降水pH值随降水量级的增大而增大，这是因为南方地区由于气候湿润、降水量大，土壤多呈酸性，人为排放的酸性物质又加重了降水酸化程度，降水量越大冲刷掉的酸性物质越多，降水pH则表现为增大的趋势，而北方地区由于环境背景酸碱度偏碱性，降水量越大冲刷掉的碱性物质越多，降水pH值表现为下降的趋势，这也是夏季南方地区降水pH较其他季节偏高，而北方地区降水pH较其他季节偏低的原因。

由于内蒙古地域辽阔、东西跨度较大，而目前酸雨观测站较少，受当地气候和局地污染排放影响，不足以代表内蒙古全区平均水平，未来还需增加酸雨观测站密度。目前来看，内蒙古酸雨和碱雨出现概率较小，尤其近些年还有下降的趋势，因此，降水酸碱度对生态环境的负面影响较小。内蒙古风沙、扬尘的缓冲能力较强，空气中大量碱性物质对酸性物质的中和作用，容易忽略人为排放的酸性物质对降水和环境的影响，抑或酸性物质被中和后是否会减少对环境的影响也未可知，未来还需进一步开展降水中离子成分的来源解析等工作，为污染防治、农业发展和生态环境建设提供参考和依据。

4 结 论

本文基于1991—2021年内蒙古酸雨站历史观测资料，分析降水酸碱度的时空变化特征，以及土壤酸碱度、气象条件和大气污染物浓度等影响因素，得出以下结论：

（1）内蒙古酸雨站历史观测的降水pH值在3.7~10.5，碱性、酸性和中性降水分别占总观测次数的63.9%、35.8%和0.3%，其中，酸雨、碱雨分别占1.1%和3.6%，发生概率较小。内蒙古大部分地区碱性降水占比高于酸性降水，仅东北部的满洲里酸性降水占比更高，这与内蒙古土壤酸碱度大多呈碱性且风沙缓冲作用较强有关。

（2）降水pH值的空间分布表现为：中部＞西部＞东部的特征，近15 a（2007—2021年）年均降水pH值的均值为6.2（满洲里）~7.2（锡林浩特），均属于非酸雨区，平均年酸雨、碱雨频率小于5%，属于酸雨、碱雨偶发，仅朱日和为碱雨少发。近5 a内蒙古大部分地区酸雨、碱雨频率减少，仅乌拉特中旗的酸雨频率和阿拉善左旗的碱雨频率上升较明显。

（3）降水pH低值多出现在夏季汛期6—9月，该时期地表植被覆盖较多，降水量较大、频次较高，风速偏小，使得地表扬起的碱性颗粒物减少，相应地人为排放的酸性物质被中和的部分也减少，而且地面偏南气流增多，水汽输送的过程中携带酸性物质，导致降水pH值降低，酸雨频率升高。

（4）降水pH高值多出现在春季4—5月和冬季1—2月，冬春季节地表裸露干燥，降水多发生在寒潮时，伴随大风、降温和沙尘天气，而且降水量小、频次低，冲刷稀释碱性物质的作用不明显，在偏北气流的控制下，更有利于来自北部地区碱性物质的输送。但由于采暖期燃煤释放SO_2和NO_x等酸性气体，在呼和浩特、通辽等大气污染物浓度较高的地区，也存在降水pH值偏低的情况。

参考文献（References）：

[1] Ali S R, Kulp J, Trisko E M, et al. Impacts of acid rain on environment[J]. An International Multidisciplinary Research Journal, 2021, 11(12): doi:10.5958/2249-7137.2021.02669.0.

[2] Tripathi A D, Xjui B O E D B, Gould R, et al. Environmental impact of acid rain: A review[J]. Asian Journal of Multidimensional Research, 2021, 10(11): 592-597.

[3] Chen Xuan, Shan Xiaoran , Shi Zhaoji, et al. Analysis of the spatio-temporal changes in acid rain and their causes in China (1998 - 2018)[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(5): 593-599.

[4] 陈璇, 章家恩, 向慧敏, 等. 2008—2018年广东省酸雨的变化趋势研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1198-1204. [Chen Xuan, Zhang Jia'en, Xiang Huimin, et al. Study on the changing trend of acid rain in Guangdong Province from 2008 to 2018[J]. Ecology

and Environmental Sciences, 2020, 29(6): 1198-1204.]

[5] 中华人民共和国生态环境部. 2020年中国生态环境状况公报[M]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2021: 18-19. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Communique on the State of China's Ecological Environment 2020[M]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2021: 18-19.]

[6] 徐菲菲, 徐赫, 熊世为, 等. 1992—2018年合肥市酸雨变化特征及突变分析[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(S1): 86-90. [Xu Feifei, Xu He, Xiong Shiwei, et al. The characteristic and abrupt change analysis of acid rain in Hefei during 1992-2018[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(S1): 86-90.]

[7] 张良玉, 魏丽欣, 赵春雷, 等. 2012—2017年京津冀区域酸雨变化特征[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 47-54. [Zhang Liangyu, Wei Lixin, Zhao Chunlei, et al. Characteristics of acid rain in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2012 to 2017[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(4): 47-54.]

[8] 牛彧文, 浦静姣, 邓芳萍, 等. 1992—2012年浙江省酸雨变化特征及成因分析[J]. 中国环境监测, 2017, 33(6): 55-62. [Niu Yuwen, Pu Jingjiao, Deng Fangping, et al. Analysis on spatial and temporal evolution of acid rain and its causes from 1992 to 2012 in Zhejiang[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(6): 55-62.]

[9] 程龙, 董昊, 刘阳, 等. 2008—2018年黄山市酸雨污染特征变化趋势分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(4): 89-95. [Cheng Long, Dong Hao, Liu Yang, et al. Analysis on the trend of acid rain pollution characteristics from 2008 to 2018 in Huangshan City[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(4): 89-95.]

[10] 郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 等. 1992—2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3644-3650. [Zheng Qiuping, Wang Hong, Chen Binbin, et al. Characteristics and the impact factors of acid rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012[J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3644-3650.]

[11] 郭雅思, 于奭, 黎泳珊, 等. 桂林市酸雨变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2897-2905. [Guo Yasi, Yu Shi, Li Yongshan, et al. Chemical characteristics and source of acid precipitation in Guilin[J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2897-2905.]

[12] 陈虹颖, 赵新锋, 何志东, 等. 2000—2016年珠海市酸雨变化特征及酸雨概念模型[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 1998-2006. [Chen Hongying, Zhao Xinfeng, He Zhidong, et al. Variation characteristics and concept model of acid rain in Zhuhai City during 2000-2016[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(6): 1998-2006.]

[13] 张静静. 土壤酸碱度调控对内蒙古草原植被群落及养分特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. [Zhang Jingjing. Effects of Soil pH Control on Vegetation Community and Its Nutrient Characteristics in Inner Mongolia's Grasslands[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.]

[14] 张宝贵, 杜建双, 李卫敏, 等. 秦皇岛降水酸碱性及其对环境的影响[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29(6): 73-77. [Zhang Baogui, Du Jianshuang, Li Weimin, et al. Acidity and alkalinity of precipitation in Qinhuangdao and its impact on environment[J]. Journal of EMCC, 2019, 29(6): 73-77.]

[15] 内蒙古自治区土壤普查办公室. 内蒙古土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 566-567. [Soil Census Office of Inner Mongolia Autonomous Region. Inner Mongolia Soil [M]. Beijing: Science Press, 1994: 566-567.]

[16] 高登好, 何南屏, 郑云华. 开远地区的弱碱雨原因初探[J]. 云南环保, 1990(2): 27-29. [Gao Denghao, He Nanping, Zheng Yunhua. Causes of weak alkali rain in Kaiyuan area[J]. Yunnan Environmental Protection, 1990(2): 27-29.]

[17] 刘安娜. 干旱区降水酸碱度变化及其影响因素分析—以石河子市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 86-89. [Liu Anna. Analysis of pH value in precipitation and the correlative factors in Shihezi[J]. Journal of Arid Land Resource and Environment, 2010, 24(4): 86-89.]

[18] Zhang Guozheng, Liu Duanyang, He Xiaohong, et al. Acid rain in Jiangsu province, eastern China: Tempo-spatial variations features and analysis[J]. Atmospheric Pollution Research, 2017, 8(6): 1031-1043.

[19] Qu Rui, Han Guilin. A critical review of the variation in rainwater acidity in 24 Chinese cities during 1982-2018[J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2021, 9(1): 00142.

[20] 杨淑娴, 张荣良, 姚素兰. 内蒙古西部酸雨的监测和分析[J]. 气象, 1988, 14(10): 39-43. [Yang Shuxian, Zhang Rongliang, Yao Sulan. Monitoring and analysis of acid rain in western Inner Mongolia[J]. Meteorological Monthly, 1988, 14(10): 39-43.]

[21] 李瑞青, 宋桂英, 迎春. 近60 a内蒙古夏季气候变化特征及其对厄尔尼诺的响应[J].干旱区研究, 2021, 38(6): 1601-1613. [Li Ruiqing, Song Guiying, Yin Chun. Characteristics of summer climate change and its response to El Niño in Inner Mongolia during the past 60 years[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1601-1613.]

[22] 苏春利, 纪倩楠, 陶彦臻, 等. 河套灌区西部土壤盐渍化分异特征及其主控因素[J].干旱区研究, 2022, 39(3): 916-923. [Su Chunli, Ji Qiannan, Tao Yanzhen, et al. Differentiation characteristics and main influencing factors of soil salinization in the West of Hetao Irrigation Area[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 916-923.]

[23] 王静爱. 中国地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2009: 47-48. [Wang Jing'ai. Geographic Atlas of China[M]. Beijing: Sino-Maps Press, 2009: 47-48.]

[24] GB/T 19117-2017. 酸雨观测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [GB/T 19117-2017. Specifications for Acid Rain Monitoring [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[25] 刘瑞翔, 陈飞, 刘端阳, 等. 连云港酸雨变化特征及其影响因子分析[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(1): 84-88. [Liu Ruixiang, Chen Fei, Liu Duanyang, et al. Analysis on characteristics and impact factors of acid rain in Lianyungang[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(1): 84-88.]

[26] 杜肖肖, 张立清, 梁海霞. 东营市空气质量指数和酸雨的变化特征及相关性分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 33-40. [Du Xiaoxiao, Zhang Liqing, Liang Haixia. Variation characteristics and correlation analysis of air quality index and acid rain in Dongying City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(1): 33-40.]

[27] QX/T 372-2017. 酸雨和酸雨区等级[S]. 北京: 气象出版社,

2017. [QX/T 372-2017. Grades of Acid Rain and Acid Rain Area [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2017.]

[28] Zeng Jie, Han Guilin , Wu Qixin , et al. Effects of agricultural alkaline substances on reducing the rainwater acidification: Insight from chemical compositions and calcium isotopes in a karst forests area[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, C(290): 106782.

[29] Wu Dan, Wang Shigong, Xia Junrong, et al. The influence of dust events on precipitation acidity in China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 138-146.

[30] 郭茵, 雷加强, 范敬龙, 等. 近20 a蒙古国土壤风蚀变化特征及主要影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1200-1211. [Guo Yin, Lei Jiaqiang, Fan Jinglong, et al. Soil wind erosion characteristics and main influencing factors in Mongolia in recent 20 years[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1200-1211.]

[31] 刘玉彻, 杨洪斌, 邹旭东, 等. 2005—2012年沈阳地区降水酸碱度变化特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S2): 116-119. [Liu Yuche, Yang Hongbin, Zou Xudong, et al. Shenyang area 2005-2012 precipitation pH variation research[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(S2): 116-119.]

Spatiotemporal variation characteristics of precipitation pH in Inner Mongolia from 1991 to 2021

HU Yanan[1,2], PEI Hao[2,3], JIANG Yanfeng[2,4], MIAO Bailing[2,4], JIA Chengzhen[2,5]

(1. Inner Mongolia Meteorological Service Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Desert Ecological Meteorological Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Meteorological Bureau, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 4. Inner Mongolia Institute of Meteorological Sciences, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 5. Inner Mongolia Ecological and Agricultural Meteorological Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: This study was established to understand the evolution of precipitation pH in Inner Mongolia since the 1990s, using the observation data of acid rain stations in Inner Mongolia, as well as meteorological elements and atmospheric pollutant concentration data, along with statistical analysis of the spatial and temporal distribution characteristics and factors influencing precipitation pH, and the frequencies of acid rain and alkali rain. The threshold of alkali rain refers to acid rain , which is defined as precipitation with pH >8.4. The conclusions are as follows: (1) Owing to the soil pH in Inner Mongolia mostly being alkaline and there being a strong buffering effect of wind sand , the proportion of alkaline precipitation is higher than that of acidic precipitation in most of Inner Mongolia, while the proportion of acidic precipitation is higher in Manzhouli in the northeast. The occurrence of acid rain and alkali rain accounted for 1.1% and 3.6%, respectively, having a low probability of occurrence. (2) The spatial distribution of the pH of precipitation shows the following order: central > western > eastern. The average annual precipitation pH range of the Inner Mongolia acid rain stations in the studied 15 years was 6.2 (Manzhouli) to 7.2 (Xilinhot), reflecting that this is not a highly acid rain-affected region. In the last 5 years, the frequency of acid rain and alkali rain has decreased in most areas, but the frequency of acid rain in Urad Middle Banner and alkali rain in Alxa Left Banner has increased significantly. (3) Low pH of precipitation mostly occurs from June to September in the summer flood season, and high pH mostly occurs from April to May in spring and January to February in winter, being closely related to vegetation coverage, precipitation, wind speed and direction, dust, and cold waves, among other factors. In addition, owing to the release of acidic gases such as SO_2 and NO_x from coal burning for heating during cold periods, the pH of precipitation is also low in winter and spring in Hohhot, Tongliao, and other regions with relatively high concentrations of air pollutants.

Keywords: precipitation pH value; acid rain; alkali rain; spatial-temporal variation characteristics; Inner Mongolia